

Wasserstoff: Ein Energieträger im Spannungsfeld zwischen Technik, Wirtschaft und Politik

T. Fleischer, E. Nieke, ITAS

Wasserstoff als politische Handlungsoption

Energierohstoffe sind Gegenstand politischer Auseinandersetzungen. Mit der zunehmenden Industrialisierung und der Steigerung des globalen Wohlstandsniveaus wächst die Nachfrage nach fossilen Ressourcen, während gleichzeitig die Grenzen ihrer Verfügbarkeit immer näher kommen. Zudem wird die Rolle der Verbrennung fossiler Energierohstoffe für regionale und globale Umweltprobleme, vor allem bei den CO₂-Emissionen, immer deutlicher. Vor diesem Hintergrund suchen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft seit geraumer Zeit nach Alternativen.

Die Idee der Verwendung von Wasserstoff als eine der möglichen „Zukunftsenergien“ beflügelt die Menschheit seit mehr als einem Jahrhundert. Die Ölpreiskrisen in den siebziger Jahren gaben Forschung und Entwicklung in diesem Bereich einen neuen Schub. Technisch wurde inzwischen viel erreicht, ökonomisch und ökologisch blieb die Wasserstoffnutzung in den Kinderschuhen stecken.

Und nun im Zuge sich wandelnder politischer Konstellationen – Rohstoffhunger der Schwellenländer, Krise im Nahen Osten, Umweltfolgen vor allem des Verkehrs – ein neuer Anlauf. Anfang 2003 kündigt Präsident Bush die 1,2 Milliarden Dollar schwere „Hydrogen Fuel Initiative“ an, Anfang 2004 zieht die Europäische Kommission mit dem „European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform“ nach.

Kann der Sekundärenergieträger Wasserstoff die Herausforderungen bei der Primärenergieversorgung mildern?

Um die Diskussion um Wasserstoff und seine zukünftige Rolle besser einordnen zu können, sei ein Blick auf Energiewandlungsketten erlaubt. Wir nutzen Energie in einer ganzen Zahl von Erscheinungsformen: Wärme, Bewegungsenergie (Maschinen- und Fahrzeugantriebe), Beleuchtung, Elektrizität (z. B. für Informationstechnik). Hierzu setzen wir meist Wandlungstechniken ein, die ihrerseits speziell dafür hergestellte (Sekundär-) oder in der Natur vorgefundene (Primär-) Energieträger verwenden. Ein klassisches illustratives Beispiel ist der Sekundärenergieträger Elektrizität, der aus einer ganzen Zahl von Primärenergieträgern gewonnen werden kann und für nahezu alle oben genannten Verwendungszwecke einsetzbar ist.

Wasserstoff ist ebenfalls ein Sekundärenergieträger, der zunächst „hergestellt“ werden muss, da er in der Natur nur in gebundener Form vorkommt. Hierzu besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten.

Das im technischen Maßstab heute wichtigste Verfahren zur direkten Wasserstoffgewinnung ist die Dampfreformierung von Naturgasen oder von bei Crackprozessen anfallenden Spaltprodukten. Daneben entsteht auch bei der Umsetzung schwerer Kohlenwasserstoffe oder von Kohle mit Sauerstoff (partielle Oxidation) und nachgeschalteter CO-Shift-Reaktion

wasserstoffhaltiges Synthesegas. Technisch bedeutsam ist des Weiteren die Wasserstoffgewinnung durch Einwirkung von Wasserdampf auf Kohle.

Weiterhin lässt sich Wasserstoff durch elektrolytische Wasserspaltung herstellen. Ökonomisch sinnvoll wäre dieses Verfahren insbesondere dann, wenn die hierzu nötige elektrische Energie billig zur Verfügung stünde oder ein hoher Reinheitsgrad des Wasserstoffs benötigt wird. Über die ökologische Bilanz entscheidet der Energiemix der Erzeugung des hier eingesetzten Stromes. Die Herstellung von sogenanntem REG-Wasserstoff als Ergebnis eines Wandlungsprozesses unter Nutzung regenerativ erzeugter Elektrizität (aus Solar- oder Windenergie, Wasserkraft oder Geothermie) ermöglicht eine CO₂-freie Wasserstoffherzeugung. Letztere lässt sich auch durch die Verwendung von Kernenergiestrom realisieren.

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse – über Vergasung oder Vergärung und mit anschließender Reformierung – verspricht hohe Systemwirkungsgrade. Zudem werden in jüngerer Zeit Verfahren der direkten biologischen Wasserstoffherzeugung diskutiert. Sie befinden sich noch in unterschiedlichen Stadien der Forschung und Vorentwicklung, keines ist heute kommerziell verfügbar.

Wasserstoff substituiert also keine Primärenergieträger, er ist auch nicht so vielseitig einsetzbar wie sein „Bruder“ Strom. Warum also Wasserstoff?

Wasserstoff in unterschiedlichen Anwendungen

Hartnäckig hält sich die Mär vom *grundsätzlich* sauberen, als „Energiequelle“ unbegrenzt verfügbaren Wasserstoff. Dies ist so nicht zu stützen. „Wasserstoff“ ist nicht die pauschal richtige Antwort auf Fragen nach der Zukunft der Energieversorgung. Vielmehr bedarf es einer differenzierten Betrachtung, wobei die Pfade der Wasserstoffherzeugung sowie die konkreten Anwendungen die entscheidenden Parameter sind.

Auf den klassischen fossilen bzw. nuklearen Energiepfaden können die Kosten der Wasserstoffherzeugung – vereinfacht gesprochen – niemals kleiner sein als die Kosten der letztlich eingesetzten Energierohstoffe – geteilt durch den Gesamtwirkungsgrad der Prozesskette. Dieser ist immer deutlich kleiner als Eins. Und hierin liegt letztlich begründet, warum energetische Wasserstoffnutzung bisher die technologische Nische nicht verlassen konnte. Mit der energetischen Bilanz eng verwoben sind Umweltgesichtspunkte.

Komplexer wird die Betrachtung bei der Verwendung regenerativ erzeugten Wasserstoffs. Sollte dieser dank deutlich gesunkener Gesteinskosten, aus Gründen der Ressourcenverknappung oder infolge von Umweltgesetzgebung verstärkt in den Markt eintreten, ist zwischen stationären und mobilen Verwendungen zu unterscheiden.

Im stationären Bereich sind Wärmeanwendungen unter Nutzung von Wasserstoff unsinnig, er wür-

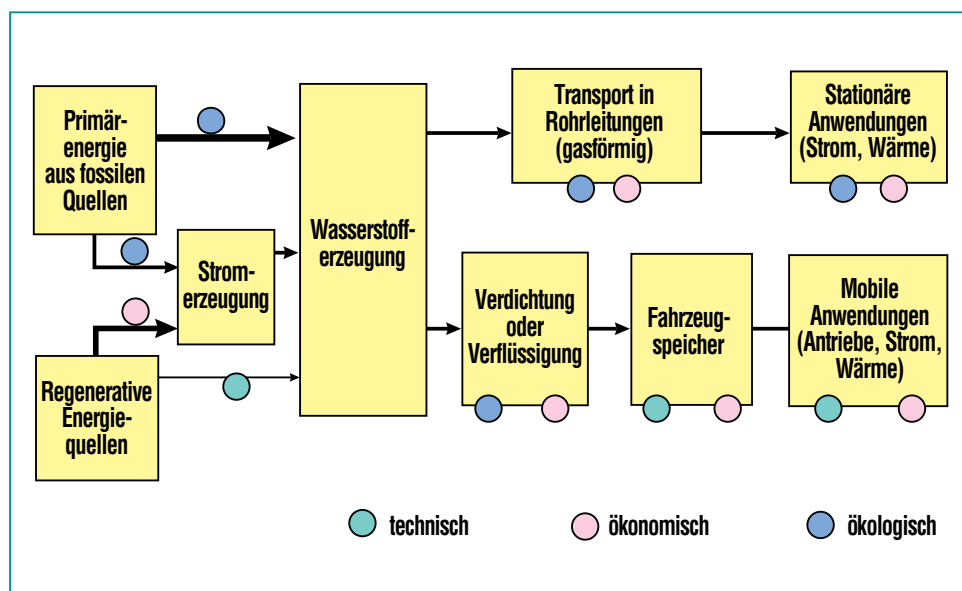


Abb. 1: Herausforderungen bei der Wasserstoffnutzung (stark schematisiert).

de vorwiegend zur Erzeugung elektrischer Energie Anwendung finden. Hierbei treten energetische Verluste auf. Die Kosten für Strom aus REG-Wasserstoff werden somit für den Nutzer – systembedingt – immer größer sein als bei der direkten Nutzung des REG-Stromes. Wo Wasserstoff direkt mit Stromanwendungen konkurriert, wird er sich darum in der Regel ökonomisch nicht durchsetzen können. Ausnahmen könnten hier beispielsweise netzferne Stromanwender sein.

Anders sieht es bei *mobilen Anwendungen*, vor allem im Verkehrsbereich aus. Zum einen ist dieser stark an den Energieträger Erdöl gebunden, zum anderen stehen für einige Verkehrsträger auch längerfristig wohl keine geeigneten Speichermedien für elektrische Energie zur Verfügung.

Hauptverbraucher ist weltweit der Straßenverkehr – mit wachsender Tendenz. Für den breiten Energiemarkt dürften hier in den nächsten

20 bis 30 Jahren noch flüssige Kohlenwasserstoffe (Benzin und Diesel) in Verbrennungsmotoren den Vorrang haben. Mittel- und langfristig sollten aber Optionen für den Einsatz erneuerbarer Energieträger nicht nur für die stationäre Energieversorgung, sondern auch im Verkehr eröffnet werden. Zum einen sind hier Emissions- und Klimaschutzgründe anzuführen, zum anderen ist die Übertragung des Konzepts einer auf Erdöl basierenden mobilen Gesellschaft auf den heute noch nicht motorisierten Teil der Welt aus Ressourcengründen nicht realisierbar.

Da Wasserstoff aus fossilen wie auch regenerativen Primärenergieträgern herstellbar ist, würde durch effiziente Wasserstoff-Antriebe eine regionale Differenzierung und Diversifizierung von Energieträgern für den Verkehr realisierbar. Zudem könnten durch ihre Entwicklung und Einführung die technische Basis für die Nutzung regenerativer Energien im Verkehr

geschaffen und ein gleitender Übergang aus der erdölbasierten in die regenerative Treibstoffversorgung ermöglicht werden.

Die Bedeutung der Infrastruktur

Für die Analyse und Gestaltung eines Energiesystems ist neben der Energieumwandlung auch die Energieverteilung von Bedeutung. Da Wasserstoff unter Umgebungsbedingungen gasförmig ist, kommt hier der Infrastruktur eine starke Rolle zu. Hierbei ist zwischen Infrastrukturen für stationäre und mobile Anwendungen zu unterscheiden, wobei erstere aus oben genannten Gründen hier nicht weiter diskutiert wird.

Die infrastrukturellen Herausforderung für *mobile* sowie *nicht an ein Wasserstoff-Netz anschließbare stationäre* Anwendungen sind komplex. Hier sind Speichertechniken erforderlich. Zahlreiche Speicheroptionen wurden entwickelt, von denen sich jede durch spezifische technisch-infrastrukturelle Eigenschaften auszeichnen, die über ihre Einsatzfähigkeit für die individuelle Anwendung entscheiden:

Flüssigwasserstoffspeicherung (LH_2) ist die massenbezogen beste Speichermethode. Da es sich bei dieser um eine Tieftemperatur-speicherung handelt, sind ihr technischer Aufwand und der parasitäre Energieverlust hoch. Druckgaswasserstoffspeicherung (CGH_2) ist die heute am weitesten verbreitete Form der Speicherung. Deren Energiedichte ist für viele Anwendungen nicht befriedigend, weshalb die Suche nach Alternativen

hierzu ein Schwerpunkt der Wasserstoffforschung ist.

Bei der Metallhydridspeicherung erfolgt die Anlagerung von gasförmigem Wasserstoff an metallischen Legierungen. Vorteile des Metallhydridspeichers sind seine relative hohe volumenspezifische Speicherdichte und eine weitgehend verlustfreie Speicherung über die Zeit, Nachteile sind seine niedrige massenspezifische Speicherdichte sowie die Tatsache, dass zur Wasserstofffreisetzung je nach Legierung teilweise hohe Temperaturen benötigt werden.

Als ein weiterer Hoffnungsträger gilt die Speicherung in Kohlenstoff-Nanoröhren. Man hat hier Speicherdichten von etwa 10 Vol.-% prognostiziert, diese aber bisher noch nicht sicher nachgewiesen. Als chancenreiche Wasserstoff-trägermaterialien haben sich in neuerer Zeit vor allem die Alanate, u. a. in Form von nanokristallinem Pulver erwiesen [1].

Neben der Verteilungsinfrastruktur stellt sich für mobile Anwendungen im *Verkehrsbereich* das Problem der *Vertriebsinfrastruktur*. Technisch ist die Entwicklung von Wasserstoff-Tankstellen weit gediehen; nicht endgültig geklärt ist der Aufbau eines hinreichenden Vertriebsnetzes. Damit sich ein weitgehend selbst tragender Markt für Wasserstoff-Fahrzeuge ausbilden kann, ist nämlich die ausreichende Verfügbarkeit von Tankmöglichkeiten sicherzustellen. Ein solcher Prozess erfordert einen zeitlichen Vorlauf vor einer Einführung solcher Energieträger und diese nutzender neuer Antriebe, seine Umsetzung scheint zwischen

Fahrzeug- und Mineralölindustrie allein derzeit nicht lösbar.

In diesem Kontext wurde des Öfteren nach stärkerem Engagement von politischer Seite gerufen und eine befristete staatliche Anschubfinanzierung ins Spiel gebracht. Jüngstes Beispiel ist die Firma Linde, die im März 2005 die Schaffung eines Ringes von 40 Wasserstofftankstellen in einem Kernbereich des deutschen Autobahnnetzes vorgeschlagen hat [2]. Eine breite Einführung von Wasserstoff im Verkehrssektor würde seitens der Politik zudem Koordination und Unterstützung im Bereich der Zulassung von Wasserstoff als Kraftstoff und bei der europaweiten Harmonisierung der Zulassungsvorschriften notwendig machen.

Brennstoffzelle und Wasserstoffwirtschaft – Siamesische Zwillinge?

Wasserstoff wird häufig in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnik diskutiert. Diese ist seit über 150 Jahren vom Prinzip her bekannt. In der Folge mit sehr unterschiedlicher Intensität untersucht, hat sie in den letzten Jahren eine Renaissance erlebt. Gründe hierfür sind in veränderten energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen als auch im wissenschaftlichen Fortschritt zu sehen.

Dabei verbirgt sich hinter „Brennstoffzelle“ keine einheitliche Technik. Aus funktionstechnischer Sicht sind auf der Basis verschiedenster elektrochemischer Reaktionen und ihrer Randbedingungen eine ganze Reihe von Brennstoffzellen-Typen denkbar und partiell auch im Labormaßstab untersucht worden.

Gemeinsam ist ihnen, dass eine elektrochemische Stromquelle bei kontinuierlicher Zuführung der Reaktionskomponenten kontinuierlich elektrische Energie erzeugt. Der entscheidende Vorteil dabei ist, dass in ihnen die chemische Energie des Brennstoffs *direkt* in elektrische Energie umgewandelt wird, im Unterschied zur konventionellen Stromerzeugung in Kondensationskraftwerken der Wirkungsgrad nicht aus physikalischen Gründen begrenzt ist.

Von der möglichen Palette sind im wesentlichen fünf Brennstoffzellen-Typen unter kommerziellen Gesichtspunkten weiterentwickelt worden, welche sich nach Betriebstemperatur, dem Betriebsdruck, den einsetzbaren Brennstoffen oder auch den verwendeten Elektrolyten unterscheiden lassen. International durchgesetzt hat sich eine Bezeichnung nach dem eingesetzten Elektrolyten.

Alle Brennstoffzellen-Systeme nutzen wasserstoffreiche Gase, wobei Niedertemperaturbrennstoffzellen (AFC, PEMFC) deutlich höhere Anforderungen an die Reinheit der Brennstoffe als Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC, SOFC) stellen. Prinzipiell ist in Brennstoffzellen-Systemen auch chemisch gebundener Wasserstoff, etwa in Form von Erdgas, Biogas, Kohlegas oder Methanol, umsetzbar.

Dieser ist durch Reformierungsreaktionen in molekularen Wasserstoff überführbar, was je nach Typ brennstoffzellenintern oder -extern erfolgen kann und mit einem entsprechenden verfahrenstechnischen und energetischen Aufwand verbunden ist. Für größere stationäre Anwendungen konzentriert man sich auf Hochtemperaturbrennstoffzellen, die die direkte Nutzung von Naturgasen erlauben.

Für mobile Anwendungen kommen – vor allem aus Sicherheits- und Effizienzgründen – derzeit nur Niedertemperaturbrennstoffzellen (vor allem die PEMFC) in Frage. Wegen deren höheren Anforderungen an die Brennstoffreinheit wird hier die direkte Nutzung von Wasserstoff als Brenngas diskutiert. Aufgrund der oben erwähnten Probleme mit dessen Speicherung wird alternativ die Nutzung von Methanol – entweder als Ausgangsstoff für eine Reformierung im Fahrzeug oder zur direkten Nutzung in einer angepassten PEMFC (auch als DMFC bezeichnet) – untersucht. Sollte eine geeignete Speicheroption zur Verfügung stehen, wiese die Wasserstoffoption gegenüber der Methanolooption für Brennstoffzellen-Antriebe energetische Vorteile auf. Gegenüber der direkten Nutzung von Wasserstoff in konventionellen Verbrennungs-

motoren käme vor allem der deutlich bessere Wirkungsgrad des Brennstoffzellenprozesses zum Tragen.

Die in Medien und Politik oft vertretene oder suggerierte Einheit von Wasserstoff-Wirtschaft und Brennstoffzellen existiert aus technischer Sicht also nicht. Wenn Brennstoffzellen in Verbindung mit Wasserstoff diskutiert werden, ist dies eher das Ergebnis multikriterieller Optimierungen, die unter anderem durch die vorgesehene Anwendung (stationär, mobil, tragbar) und daraus resultierende technische Anforderungen, durch Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und durch Anforderungen in Bezug auf Energieeffizienz und Umweltwirkungen beeinflusst werden [3]. Technisch brauchen Brennstoffzellen keine Wasserstoff-Wirtschaft, wohl aber wird eine Wasserstoff-Wirtschaft vor allem aus Gründen der Wirtschaftlichkeit auf die Verfügbarkeit von Brennstoffzellen angewiesen sein.

Literatur

[1] M. Fichtner, O. Fuhr, O. Kircher, A. Léon, *NACHRICHTEN – Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrg. 37 1-2/2005, S. 52-58*

[2] *Linde plant Netz von Wasserstoff-Tankstellen. Konzernchef Reitzle schlägt „Wasserstoff-Highway“ für Deutschland vor – Kosten mit 30 Millionen Euro „überraschend gering“.* Die Welt vom 22.02.2005

[3] D. Oertel, T. Fleischer, *Brennstoffzellen-Technologie: Hoffnungsträger für den Klimaschutz. Technische, ökonomische und ökologische Aspekte ihres Einsatzes in Verkehr und Energiewirtschaft. Berlin: Erich Schmidt 2001 (Beiträge zur Umweltgestaltung, Bd. A 146)*